

# 钛焊缝的对置串列 PCI 与脉冲回波 TFM 组合检测

郭剑豪

(上海贤达美尔森过程设备有限公司, 上海 201411)

**摘要:** 随着近年来 PCI 技术及 TFM 技术的发展与应用, 与 FMC 及 PWI 所对应的数据处理方式已日渐丰富, 从原先优化定性的辅助工具逐步转变为可用于实际检测的整套先进技术。针对钛焊缝检测中 PCI 技术与 TFM 技术的组合使用开展了相关分析, 进行了二者与 FMC 和 PWI 配合使用的不同结合方式的对比试验。结果表明, 采用 PWI-TFM 与对置串列 PWI/FMC-PCI 组合检测方式, 能够优化钛焊缝检测效率与成像质量。

**关键词:** 全矩阵采集; 平面波激发; 全聚焦; 相位相干成像

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2024)03-0009-07

## The combination examination of opposing tandem PCI and pulse-echo TFM for titanium welds

GUO Jianhao

(Mersen Xianda Shanghai Co., Ltd., Shanghai 201411, China)

**Abstract:** With the development and application of PCI technology and TFM technology in the past years, the data processing methods corresponding to FMC and PWI have become increasingly rich, gradually transforming from optimizing qualitative auxiliary tools to a complete set of advanced technologies that can be used for practical examination. This paper conducted relevant research on the combination of PCI technique and TFM technique. By comparing different combination of these two methods, it was concluded that the examination efficiency and imaging quality of titanium weld seam can be optimized by adding the opposing tandem PWI/FMC-PCI technique to PWI-TFM technique.

**Key words:** full matrix capture; plane wave imaging; total focusing method; phase coherence imaging

## 1 原理

### 1.1 全聚焦(TFM)和相位相干成像(PCI)

全聚焦(Total focusing method, TFM)技术是一种用于全矩阵捕获(Full matrix capture, FMC)、平面波激发成像(Plane wave imaging, PWI)等超声阵列采集方式的后处理技术。其数据处理基于延迟及求和(Delay and sum, DAS)操作; 在关注区域(Region of interest, ROI)内选择一个点, 通过计算

该点到激发晶片(晶片组)及接收晶片的声时(Time of flight, ToF), 从而在 FMC(或 PWI 等)原始采集的 A 扫描信号中提取所选点对应的波幅信息, 进而将所有发射-接收晶片组合对应的波幅叠加得到一个“聚焦”的波幅信息。反复进行此步骤直至 ROI 内所有点均完成 DAS 后, 可将 ROI 内各点的“聚焦”波幅汇总为 TFM 图像。

相位相干成像(Phase coherence imaging, PCI)技术是一种适用于信号相位信息的数据后处理、成像方法。与 TFM 技术类似, 其同样可用于 FMC、PWI 等采集方式所取得的数据<sup>[1]</sup>。其算法整体思路也与 TFM 的类似, 均为在选定的 ROI 内对各个点进行 DAS 运算以达到“聚焦”的效果。与 TFM 的差异在

收稿日期: 2023-08-02

作者简介: 郭剑豪(1990—), 男, 工程师, 主要从事承压设备质量管理及检测技术应用研究

通信作者: 郭剑豪, enzio.g@qq.com

于,PCI 算法去除了波幅信息,仅通过相位信息进行成像。PCI 技术通过对 FMC 或 PWI 等方式采集的原始超声信号进行 Hilbert 变换,将其波幅与相位分离后单独提取相位,经符号函数简化(非必要)并进行与全聚焦类似的叠加处理后可获得 ROI 内各点的相位相干程度,将不同相干程度(最小为 0,最大为 1)用不同颜色表示后即可得到 PCI 图像。

实际检测中,相比 PCI,TFM 对面状缺陷的检测效果更好,而 PCI 对点状缺陷或面状缺陷的端点更敏感<sup>[2]</sup>。由于波幅信息在 PCI 算法中完全舍去,故判读图谱时不以波幅为依据。PCI 成像结果一般通过信号相位相干程度(频率分布集中程度)及位置来判断是否为缺陷。一般认为相位相干程度较高的区域是缺陷或几何结构,而相位相干程度低的区域则是无缺陷的。

### 1.2 对置串列

串列式布局是常规超声检测中一种实用的布局,一般将两个探头一前一后放置于焊缝同侧并将

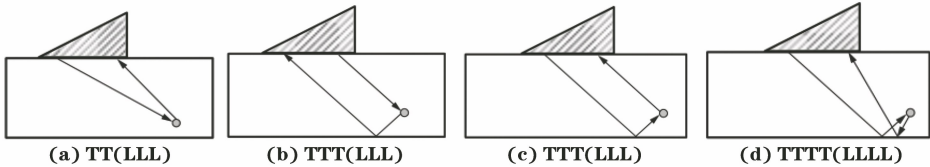


图 1 TFM 声束路径示意

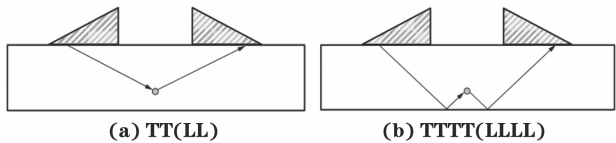


图 2 对置串列布局的声束路径示意

对置串列 TFM/PCI 技术在检测中可提供类似于 TOFD 的成像效果,其对缺陷的方向性不敏感,但更多依赖端点的信号进行定量<sup>[3]</sup>。

## 2 仪器及试件

检测所用仪器为 Eddyfi (M2M) Gekko 64: 128PR TFM64 型相控阵检测仪,其具备 FMC 及 PWI 激发方式且可用 TFM 或 PCI 作为后处理算法。检测中使用的探头为一对 GCS-5L64 超声阵列探头,探头为中等孔径被动轴聚焦型,具有极佳的信噪比及精确的定量能力。

焊接了一组不同板厚的钛焊接试件,包含厚度为 8 mm 的氩弧焊 V 形坡口(焊接 2 个坡口未熔合,加工上、下表面槽、坡口面槽各 1 个)、厚度为 17 mm 的 K-Tig 深熔焊无坡口(加工上下表面槽、

仪器设置为一发一收模式,此时两探头声束交叉区域为有效的检测区域。这项技术广泛应用于中厚板焊缝检测、窄间隙焊缝检测、全自动超声(Automatic ultrasonic testing, AUT)等多种场景。随着 TFM 技术的出现,阵列超声探头内各晶片到达 ROI 区域内各点的不同声束路径可通过 TFM 方式分别计算,同时也带来了串列式布局、模式的演进,出现了阵列探头自串列模式如 TTT、TTTTT 和 LLL 等(见图 1),以及类似于 TOFD 探头布局的阵列探头对置串列模式。自串列模式中 TFM 计算的声束路径为自探头出发,经底面反射后至 ROI 内点,再次反射后回到探头;而对置串列模式一般使用 TT(LL)和 TTTT 的声束路径(见图 2),其中 TT(LL)指横波(纵波)声束从一侧探头出发,经 ROI 内点反射至另一侧探头,TTTT 则是在 TT 基础上在发射侧和接收侧各增加一次底面反射路径。此外,无横波或横波非常微弱的材料中也可使用 LLLL 等声束路径,如 PE 材料等。

熔合线处槽各 1 个)、厚度为 20 mm 的氩弧焊 X 形坡口[焊接了坡口未熔合 2 个、上下表面未熔合(不开口)2 个、未焊透 2 个]等。

## 3 检测效果

### 3.1 PCI 检测

分别采用 FMC、6°步进 PWI 激发对厚度为 17 mm 钛焊缝进行 PCI 检测,结果如图 3,4 所示。

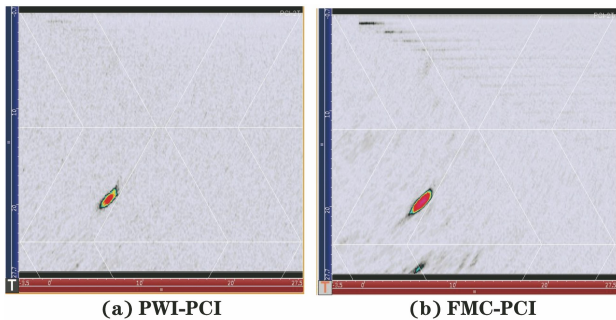


图 3 6°步进大孔径探头的同侧未熔合检测结果

从图 3,4 中可以看出,FMC 采集时成像最干净,质量最佳,较大孔径探头对 PWI-PCI 成像有一定优化效果,可有效减少激发次数较少导致的干扰

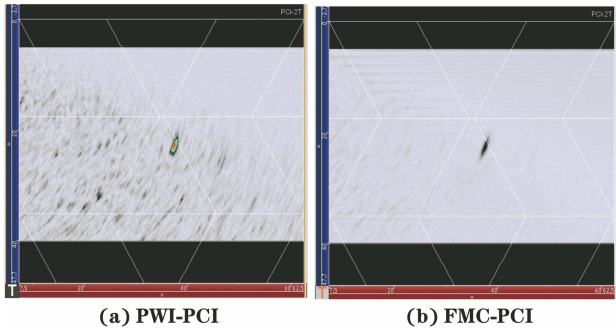


图 4 6°步进中等孔径探头下表面侧槽检测结果

信号。由图 4 可知,单个晶片激发时穿透力较弱,钛焊缝对侧的缺陷信号相干度较低,有漏检的可能。且由于 PCI 无法通过提高增益来提升信号相干度(实时成像阶段),只能采用更换探头、调整脉冲形式或长度、增加激发电压等方式进行优化。PWI-PCI 与 FMC-PCI 成像质量对比如图 5 所示,可知 FMC-PCI 对表面槽成像的强度很低,在成像时提高增益而 PCI 强度并无任何变化,但如果大幅降低增益却有可能无法进行 PCI 成像(PCI 在“无回波”的情况下无法工作)。笔者在更换探头、调整脉冲形式或长度、增加激发电压后观察到 PCI 成像强度的明显变化。这些调整改变了声束对钛材料的穿透力且不同探头晶片间距对 PCI 强度有明显影响。不同探头激发电压时的穿透力对比试验结果如图 5~7 所示,试验结果表明:FMC 采集时,如需对厚度为 20 mm 的钛焊缝获得较好的信号相干程度,需将 GCS-5L64 探头的激发电压(双极性方波)提高至 80 V 以上;对于中等尺寸的阵列探头,6°步进 PWI 相对于 FMC 有过于明显的干扰信号,成像质量不佳;而 2°步进 PWI 图像质量介于两者之间。从检测速度来看,FMC 采集时数据量最大速度最慢,2°步进 PWI 次之,6°步进 PWI 最快。

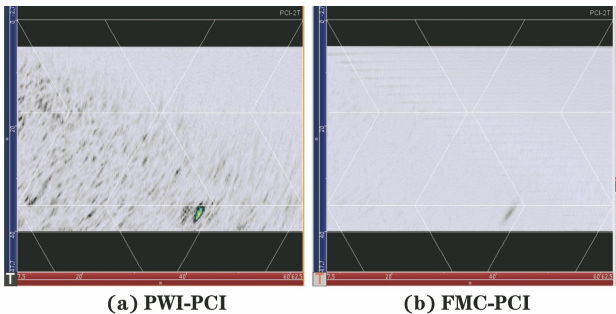


图 5 探头激发电压为 40 V 时 PWI-PCI 与 FMC-PCI 的成像质量对比

对于一些较小的缺陷,PCI 技术有一定局限性。虽然可获得高相干的图像,但由于无法分离小缺陷

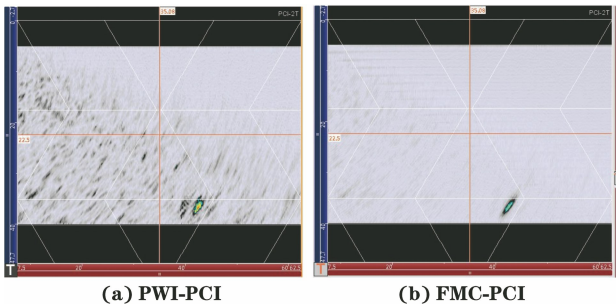


图 6 探头激发电压为 80 V 时 PWI-PCI 与 FMC-PCI 的成像质量对比

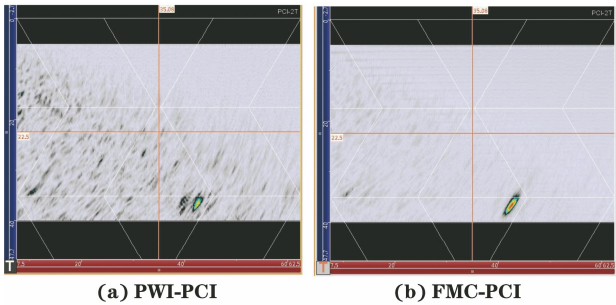


图 7 探头激发电压为 120 V PWI-PCI 与 FMC-PCI 的成像质量对比

“端点”,故难以定量。图 3 至图 7 中所示缺陷高度均很小,为 1~1.5 mm,其 PCI 图像无法分离上下端点的衍射信号,因此也无法测量这些缺陷的高度。同时 PWI-TFM 在检测中对缺陷端点衍射信号更加灵敏,如图 8 所示,FMC-PCI 对坡口未熔仅能发现一个端点无法定量,而 PWI-PCI 可同时发现上下两个端点并准确定量。

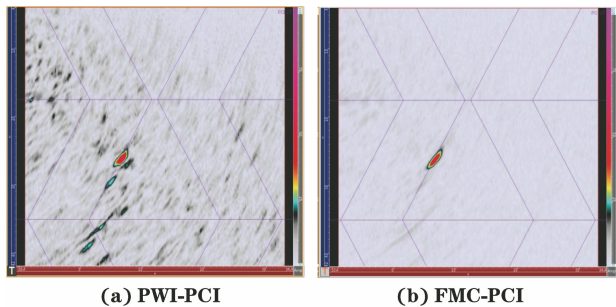


图 8 PWI-PCI 与 FMC-PCI 检测 17 mm 厚钛焊缝坡口刻槽的结果

### 3.2 TFM 检测

采用 FMC、6°步进 PWI 分别对 20 mm 厚钛焊缝进行检测,检测结果如图 9,10 所示。

从图 9,10 中可以看出,FMC 采集时图像质量与 6°步进 PWI 的基本一致,但由于单个晶片激发时超声波对钛材料的穿透力较弱,FMC 采集时整体波幅略低(无 TCG);而 6°步进 PWI 图像质量保持基本一致,

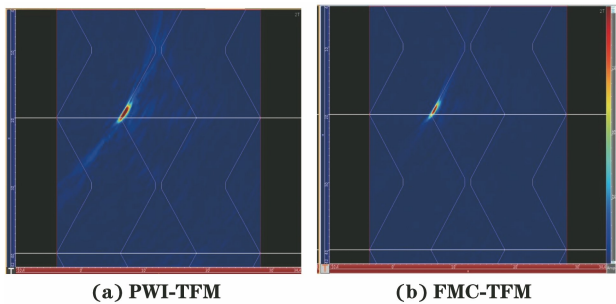


图 9 PWI-TFM 和 FMC-TFM 对同一下表面未熔合的成像结果对比

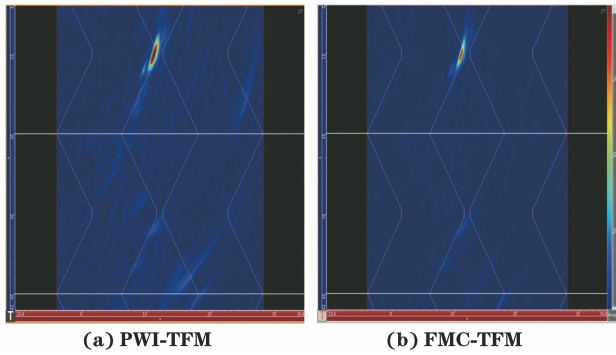


图 10 PWI-TFM 和 FMC-TFM 对同一未焊透的成像结果对比

其全孔径激发在钛焊缝上的穿透力较好,尤其是对侧的缺陷波幅无明显损失,不易漏检。另外,从检测速度来看,FMC 采集时数据量大速度慢,而 6°步进 PWI 数据量小且速度明显快。

与 PCI 相比,TFM 的成像噪声水平会更高,但在高角度区域会有质量更优的信号,二者可互相印证,可综合二者信息以更好地对缺陷进行评判。钛焊缝

中一个细小未熔合的成像如图 11 所示,可以看出 TFM 在一次波范围内也检测到了该未熔合缺陷,与二次波区域的高波幅信号互相印证;而 PCI 成像中整体噪声明显更低,但无法在一次波区域内观察到缺陷信号。同时,在缺陷定性方面,TFM 成像有极高的波幅,容易正确识别微小的未熔合;而 PCI 成像由于相干性最大为 1(100%),难以通过相干程度区分图像中的红点是未熔合还是气孔。

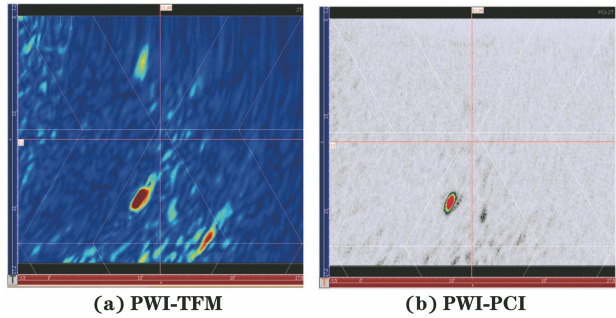


图 11 PWI-TFM 与 PWI-PCI 对同一坡口未熔合的成像结果对比

### 3.3 对置串列检测

通过对脉冲回波下 FMC/PWI-TFM 和 FMC/TFM-PCI 的对比可看出,6°步进 PWI-TFM 可兼顾速度与成像质量,而 2°步进 PWI-PCI 成像质量和速度均较好,FMC-PCI 有最佳成像质量但速度较慢。考虑到成像算法的相似性及成像速度、质量可能存在的差异,在对置串列检测中分别采用 FMC-PCI、6°步进 PWI-TFM、2°步进 PWI-PCI 对厚度为 20 mm 的钛焊缝进行检测,得到结果如图 12,13 所示。

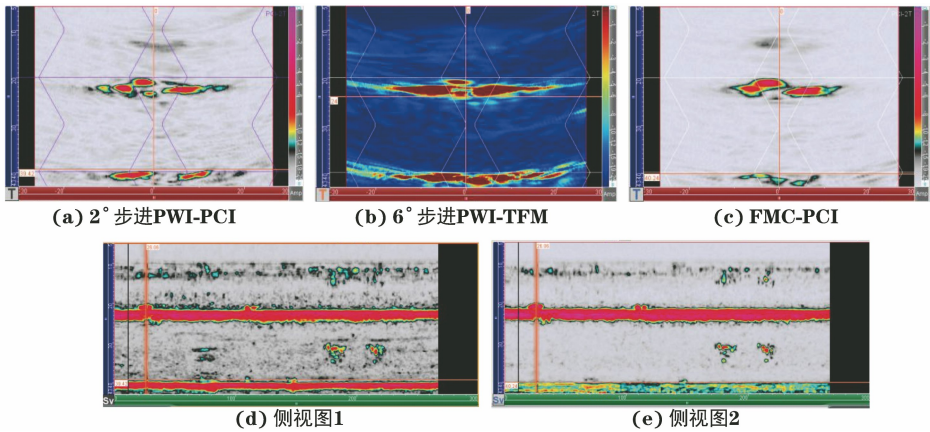


图 12 FMC-PCI,6°步进 PWI-TFM,2°步进 PWI-PCI 对上表面未熔合缺陷的成像结果对比

从图 12,13 中可看出,FMC-PCI 的图像干扰信号最少,但相比于 PWI-PCI,其上表面成像质量下降,与前文所述 PCI 成像对比情况相同。FMC 采用单个晶片激发,能量较 PWI 的会弱一些,在钛

焊缝检测中略显能量不足。从其侧视图中可以看出,FMC-PCI 对上表面(不开口)未熔合缺陷有较大的漏检风险,而 PWI-PCI 对该缺陷端点成像的效果最佳,可以在定量时取得最大的便利。6°步进

PWI-TFM 相对于两组 PCI 在焊缝底面及表面轮廓的成像上更准确、清晰。但由于 TFM 相比 PCI 对面状的反射体有较高的波幅(强度)和更完整的成像效果,也会带来更大的上下表面盲区。同时,对置串列 TFM 在缺陷部位的波幅并不如脉冲回波的 TFM 组高,如果进一步提高增益,反而会使底噪变大且盲区过大;2°步进 PWI-PCI 图像质量在三者中并不突出,但其检出率及缺陷信号的相干度非常好,可以从侧视图中看出,钛焊接试板内的 6 个人工缺陷均有很好的检出效果。在另一个

不同激发电压的对比试验中发现,可以采用调高激发电压的方式进一步优化图像质量,同理调整激发脉冲、更换更大孔径探头也会有同样效果。与波幅技术不同的是,适当增加电压后噪声信号会增加,而可降低无缺陷区域的信号相干程度,对于 PCI 则可以减少成像时的干扰获得更干净的图谱。考虑到 6°步进 PWI-PCI 图像质量会较 2°步进 PWI-PCI 图像质量进一步下降,未再对其进行试验。从检测速度来看,FMC-PCI 速度最慢,2°步进 PWI-PCI 次之,6°步进 PWI-TFM 最快。

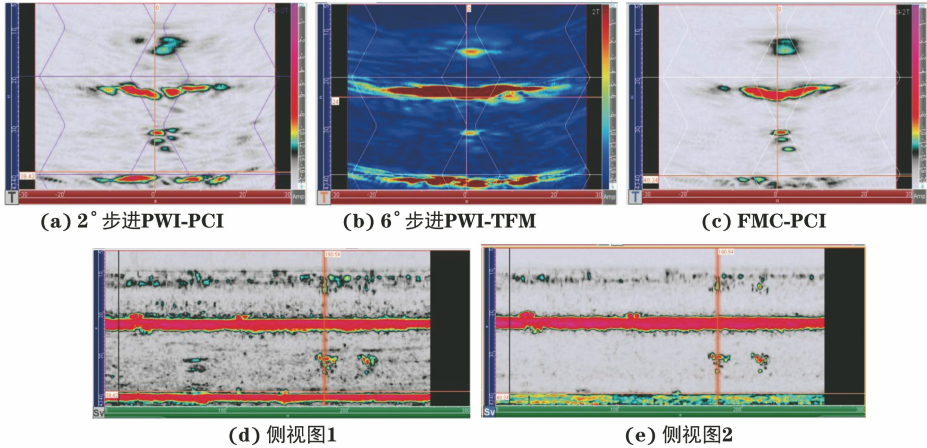


图 13 FMC-PCI,6°步进 PWI-TFM,2°步进 PWI-PCI 对未焊透缺陷的成像结果对比

### 3.4 综合选择

确定最终检测工艺时,主要考虑以下几个方面的因素:① 工艺是否符合产品设计标准所引用的检测标准;② 检测成像质量与评图难易程度;③ 不同组之间的关联性 & 互相印证的可能性;④ 检测速度是否与驱动方式相适应。各项技术的差异对比如表 1 所示。

表 1 各技术组合的差异对比

技术类型	检测速度	成像质量	标准
FMC-TFM	慢	优秀	有
PWI-TFM	快	优秀	有
FMC-PCI	慢	优秀	缺少相关标准
PWI-PCI	较快	较好	缺少相关标准
对置串列 PWI-TFM	快	优秀	有
对置串列 FMC-PCI	慢	优秀	缺少相关标准
对置串列 PWI-PCI	较快	较好	缺少相关标准

在脉冲回波组的选择上,选择左右两侧各 1 个脉冲回波 TFM 组(ROI 应覆盖一次和二次波含余高)进行检测。一方面,脉冲回波在标准中有大量的条款而更加容易得到符合标准的工艺<sup>[4]</sup>;另一方面,TFM 组可与大步进 PWI 组合,相比于 PCI 需要与小步进 PWI 或 FMC 组合的方式,效率更高且更适合现场检测。此外,脉冲回波 TFM 组的成像与相控阵超声成像更相似且对面状缺陷具有更好的成像

能力,图谱判读时也可参考相控阵超声的经验(特征、波幅等均高度相似)。

对于对置串列组,为该组选择了 PCI 方式。PCI 相对于 TFM 底波和上表面波成像更细,盲区范围更小。由于对置串列布局下 TFM 无法发挥其对面状缺陷成像的优势,相反在 PCI 方式下更容易观察缺陷端点的信号,因此 PCI 在定量上也显示出优势(类似于 TOFD<sup>[3]</sup>)。同时,PCI 组相较 TFM 组也具备与波幅无关的优势,对耦合不良的敏感度降低且成像更干净。需要注意的是,与 TFM 相比,PCI 可能需要比较小的 PWI 激发步进或用 FMC 方式采集数据时,会相应地降低检测速度,实际薄板工艺中检测速度仍可满足现场检测的需求,但厚板的检测速度较慢。综合以上几点,PWI-PCI 在对置串列布局下整体优势明显,因此对置串列组选择 PCI。

使用 2 个脉冲回波 TFM 组加 1 个对置串列 PCI 组的检测结果也可互相进行印证及补充。比如,TFM 组对未熔合缺陷成像比较完整,可以看出其面状特征;而 PCI 组则以端点衍射信号和上端点的反射信号为主,类似于 TOFD 的定量方式且更直观、简单,此时对置串列 PCI 的定量要比 TFM 组更

容易也更准确。再如针对细小的面状缺陷,PCI 组可能无法分辨缺陷类型也无法定量,而 TFM 组仍有有效的定性及定量能力;相反地,如果碰到气孔类缺陷,TFM 组往往波幅较低或完全无法检测到,但 PCI 组对于微小气孔有较好的检出能力(高相干性),可以有效补充 TFM 组的不足之处。

以厚度为 8 mm 的钛板为例,使用 2 组脉冲回波 TFM 加 1 组对置串列 PCI(二次波和三次波)进行检测,检测结果如图 14~18 所示,可以看出,坡口 EDM 槽和坡口未熔合缺陷在不同组中均可有效发

现,TFM 组中可完整成像,而 PCI 组中可看出其上下端点的衍射信号,便于定量。需要额外注意的是,图 18 中 TFM 组由于耦合不良,出现了明显的耦合信号,这在 PCI 组中并不会出现,PCI 在 TFM 受耦合影响的部位可提供有效的成像。从图 15,16 中可看出,上、下表面 EDM 槽在 TFM 和对置串列 PCI 中均可发现端点信号,而 TFM 组对端点信号更为敏感。图 15 中对置串列组未检出上表面槽的端点衍射信号,但移动探头轻微改变前端距后可发现其端点信号,具体原因有待进一步试验分析。

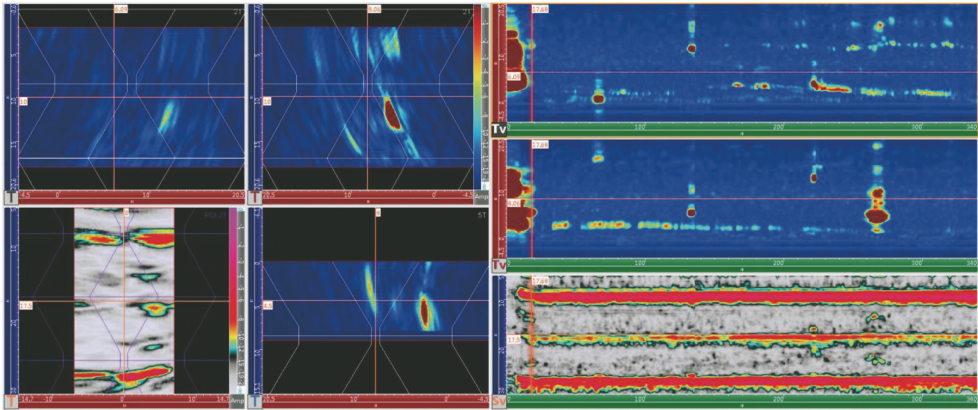


图 14 厚度为 8 mm 的钛板坡口 EDM 槽的检测结果

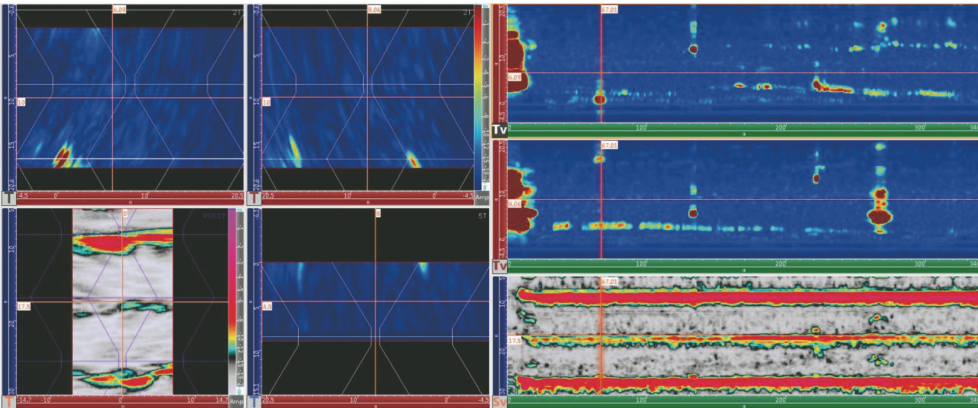


图 15 厚度为 8 mm 的钛板上表面 EDM 槽的检测结果

4 结语

PCI 技术作为一种与波幅无关的技术,现阶段仍有一定不足之处,但无疑对 TFM 的检测结果是一种很好的补充。一方面有助于缺陷在高度方向上的定量和缺陷性质的判定,另一方面,也可在耦合不良时提供较为有效、干净的成像结果。但 PCI 原理相较于基于波幅的超声检测技术是不同的,对图谱判读也有新的要求。目前阶段,其仍适宜与波幅相关的技术结合使用。同时,使用 PCI 对钛焊缝检测时

应考虑晶片阵列的激发方式,单晶片激发时可能会因能量不足无法接收到有效的回波进而漏检缺陷。不同于波幅类技术可以设置灵敏度或 TCG(深度补偿)使波幅均匀一致,对于钛焊缝或其他衰减较大的材料,PCI 检测工艺编制过程中需将穿透力作为一项基本要求来考量。

通过两组脉冲回波 PWI-TFM 与一组对置串列 PWI-PCI 的组合,实现了钛焊缝检测效率和成像质量的兼顾。其组合检测效果更优于相控阵超声与 TOFD 组合的效果。相对于相控阵超声,TFM 成

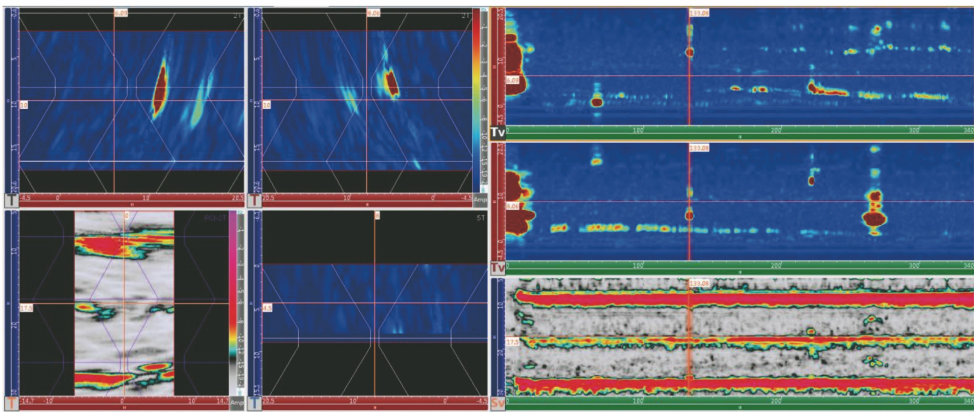


图 16 厚度为 8 mm 的钛板下表面 EDM 槽的检测结果

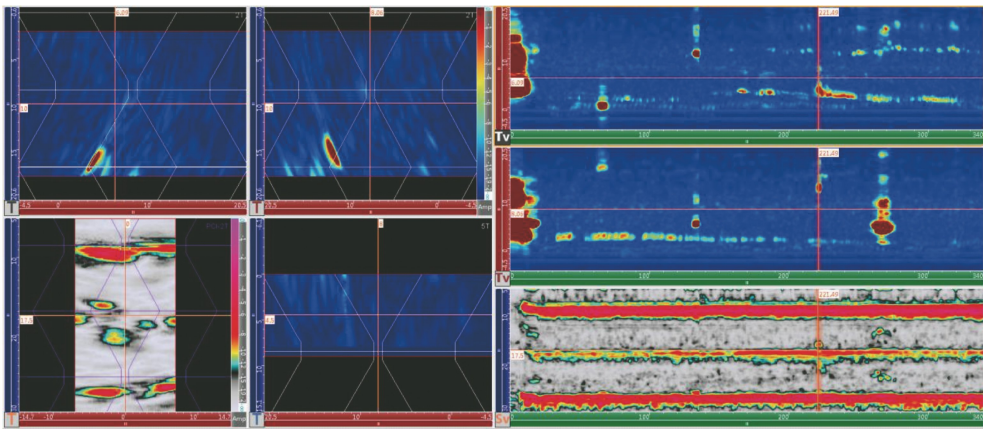


图 17 厚度为 8 mm 的钛板上表面(不开口)坡口未熔合缺陷的检测结果

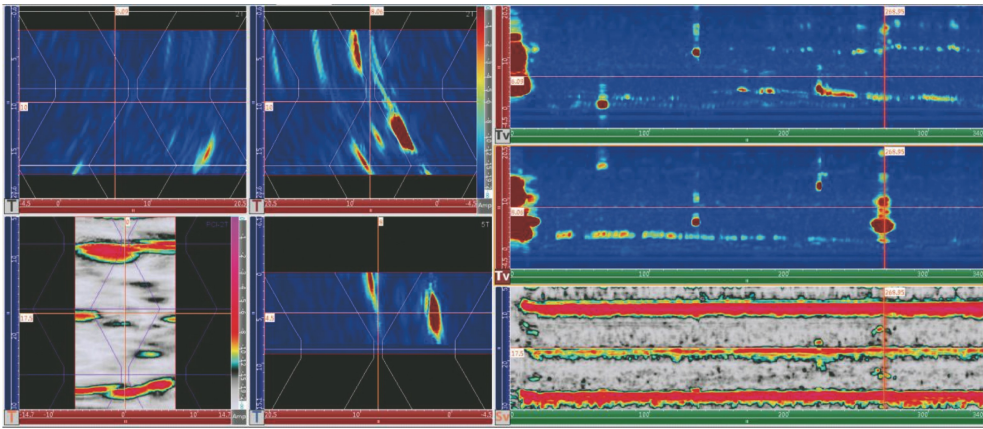


图 18 厚度为 8 mm 的钛板坡口未熔合缺陷的检测结果

像质量更佳,而对置串列技术不仅成像比 TOFD 图谱更直观,还解决了 TOFD 上表面盲区大和适用材料少的问题。

参考文献：

[1] CRUZA J F,CAMACHO J,FRITSCH C. Plane-wave phase-coherence imaging for NDE[J]. NDT & E International,2017,87:31-37.  
[2] REVERDY F, TECHNOLOGIES E, HILLMAN P, et

al. Total focusing method (TFM) and phase coherence imaging (PCI) applied to various industrial cases[J]. E-journal of Nondestructive Testing, 2023, 28(8):143-147.

[3] GAUTHIER B, PAINCHAUD-APRIL G, LE DUFF A, et al. Towards an alternative to time of flight diffraction using instantaneous phase coherence imaging for characterization of crack-like defects[J]. Sensors, 2021, 21(3): 730-732.

[4] 郭剑豪. ASME 标准对 FMC 检测的要求[J]. 无损检测, 2023, 45(2): 77-82.